

УДК 574.55

Рубрика 34.35.33

АНАЛИЗ ПИГМЕНТНОГО СОСТАВА И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ АЛЬГО-БАКТЕРИАЛЬНЫХ И МАТОВ ЗЕЛЕННЫХ НИТЧАТЫХ ВОДОРОСЛЕЙ КИСЛО-СЛАДКОГО ОЗЕРА В ОКРЕСТНОСТЯХ БС МГУ ИМ. Н.А. ПЕРЦОВА

ANALYSIS OF THE PIGMENT COMPOSITION AND PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF ALGO-BACTERIAL AND MATS OF GREEN FILAMENTOUS ALGAE OF SWEET AND SOUR LAKE IN THE VICINITY OF THE WSBS OF THE N.A. PERTSOV

Галыш Анастасия Андреевна¹, Сидоченко Никита Дмитриевич¹, Еланская Анна Сергеевна¹, Нагаева Анастасия Сергеевна¹, Быкова Екатерина Алексеевна¹, Воронов Дмитрий Анатольевич², Краснова Елена Дмитриевна²

¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*

² *Институт проблем передачи информации РАН, Москва*

Galysh Anastasia Andreevna¹, Sidochenko Nikita Dmitrievich¹, Yelanskaya Anna Sergeevna¹, Nagaeva Anastasia Sergeevna¹, Bykova Ekaterina Alekseevna¹, Voronov Dmitry Anatolyevich², Krasnova Elena Dmitrievna²

¹ *Moscow State University M.V. Lomonosov, Moscow*

² *Institute for Information Transmission Problems RAS*

Введение

На побережье Белого моря обнаружено большое число озер, находящихся на различных стадиях удаленности и обособленности от береговой линии, ввиду послеледникового поднятия, и характеризующихся устойчивой вертикальной стратификацией. Каждый слой воды с его набором физико-химических характеристик служит биотопом для отдельного экологического сообщества. Такие водоемы называются меромиктическими, а явление – меромиксией. Меромиктические озера являются уникальными экосистемами, в которых фототрофные организмы, обитающие в пределах отдельного слоя, подстраивают свои антенные комплексы для улавливания света с тем спектральным составом, который достигает зоны их обитания, и на разной глубине они различаются. Существуют также конгломераты фотосинтезирующих организмов. Один вариант – плотно переплетенные маты нитчатых зеленых водорослей, преимущественно рода *Cladophora*. Другой вариант – коричневые маты, более рыхлые и без ярко выраженной структуры; в их состав входят диатомовые водоросли и цианобактерии комплексе с другими одноклеточными или/и многоклеточными водорослями, а также другими бактериями и даже простейшими. Такие, гетерогенные по своему составу, сообщества называют альго-бактериальными матами. Летом 2023 г, в одном из прибрежных озер, в Кисло-Сладком, наблюдалась вспышка образования матов из нитчатых водорослей, которые, формируясь на дне, постепенно всплывали на поверхность за счет пузырьков кислорода, выделяемого в результате фотосинтеза. Существенная доля

площади озера оказалась покрыта матами. Кроме того, были обнаружены альго-бактериальные маты, также всплывающие со дна озера. Зимой-весной 2023 г в озеро из моря поступила более плотная вода с высокой соленостью и произвела полное перемешивание водной толщи, что привело к нарушению сложившейся в предыдущие годы стратификации и обогащению всей водной массы биогенными веществами, накопившимися в анаэробной зоне. В связи с этим летом 2023 г. возникла необходимость оценки фотосинтетической активности водорослевых и альго-бактериальных матов в Кисло-Сладком озере.

Задачами данной работы были: 1) оценка пигментного состава фототрофных компонентов водорослевых и альго-бактериальных матов; 2) определение фотосинтетической активности методом индукции переменной флуоресценции хлорофилла *a* и сравнение по этим параметрам матов с вегетативными частями покрытосеменного донного растения *Ruppia maritima* L., растущего на мелководье этого озера. Впоследствии полученные данные могут помочь в анализе вклада водорослевых и альго-бактериальных матов в первичную продукцию водоема и генерацию кислорода.

Материалы и методы

Измерения и отбор проб проводили в июле 2023 года. Пробы из матов нитчатых водорослей были отобраны с поверхности оз. Кисло-Сладкое и со дна с применением погружного насоса. Кроме того, на разной глубине водоема определяли следующие параметры воды: соленость, содержание растворенного кислорода, редокс-потенциал, pH и температуру. Для сравнения были отобраны образцы таких же матов из нитчатых водорослей *Cladophora* в приливно-отливной зоне моря рядом с озером Кисло-Сладкое.

Фальконы с отобранным материалом заворачивали в фольгу, чтобы предотвратить деградацию пигмент-белковых комплексов под действием солнечного света. Для определения пигментного состава требовалось предварительное экстрагирование пигментов. На первом этапе мы брали небольшое количество материала и растирали его в ступке с помощью пестика в 90% ацетоне с последующим фильтрованием через бумажный фильтр. Затем полученный экстракт переливали в кювету. Спектры поглощения света измеряли на спектрофотометре Solar PV 1251 в диапазоне длин волн 380 – 800 нм. На втором этапе мы анализировали полученную спектральную кривую, устанавливая соответствие между явно выраженными пиками, обозначающими максимумы поглощения света в экстракте и фотосинтетическими пигментами, пользуясь следующими источниками [Britton *et al*, 2004; Taniguchi, Lindsey, 2021]. Мы также определяли концентрацию хлорофиллов *a* и *b* методом спектрофотометрии, рассчитывая их по формулам S.W. Jeffrey и G.F. Humphrey [Jeffrey, Humphrey, 1975].

Для измерения фотосинтетической активности методом индукции переменной флуоресценции хлорофилла использовали портативный флуориметр AquaPen-C AP 100-C (Photon Systems Instruments, Чехия). Флуоресценцию индуцировали светом длиной волны 455 нм и интенсивностью 3000 мкмоль квантов·м⁻²·с⁻¹ в течение 2 с. Перед измерениями пробы предварительно взвешивали на аналитических весах для дальнейшего расчета концентрации пигментов в мкг/г сырой массы, а затем адаптировали к темноте в течение 10 мин. Предварительная темновая адаптация требовалась для того, чтобы перевести все

фотосинтетические реакционные центры в «открытое» состояние, а также для окисления всех электронных переносчиков фотосистемы II (ФС II). При включении фотохимически активного освещения на приборе, начиналась быстрая фаза индукции флуоресценции хлорофилла а. Сигнал флуоресценции хлорофилла детектировался PIN-фотодиодом со светофильтром (667 – 750 нм). Зарегистрированные ОЛР-кривые, анализировали с помощью ЛР-теста в соответствии с [Strasser et al., 2004]. Интенсивность флуоресценции при 50 мкс (Fo), 100 мкс, 300 мкс, 2 мс (FJ), 30 мс (FI) и максимальный уровень флуоресценции (FM = Fp) использовали при расчете параметров флуоресценции из индукционных кривых. Фотосинтетическую активность фотосинтезирующих организмов определяли по параметру максимального квантового выхода первичной фотохимической реакции в ФС II как $(Fm-Fo)/Fm = Fv/Fm$.

Результаты и обсуждения

Увеличение содержания кислорода в июне-июле 2023 г. в оз. Кисло-Сладкое

Летом 2023 г. в озере Кисло-Сладкое было обнаружено существенное накопление кислорода под пинноклином (слоем скачка солёности) на глубине 1 м и ниже. На рисунке 1 приведены вертикальные профили содержания кислорода в толще воды озера с 11 июня по 16 июля 2023 г. Подобное явление указывает на наличие активно фотосинтезирующих организмов, обитающих на дне или в толще воды озера.

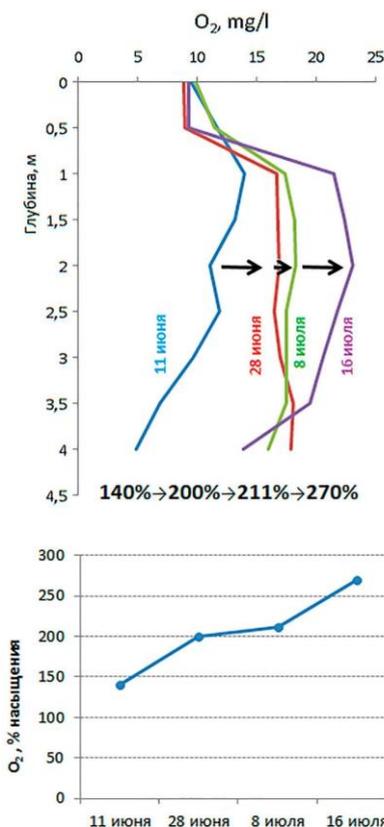


Рис. 1. Накопление кислорода в июне - июле 2023 г. в озере Кисло-Сладкое. На диаграмме приведены вертикальные профили концентрации растворенного в воде кислорода, а также его концентрация на глубине с максимальным содержанием в процентах насыщения.

Оценка фотосинтетической активности

В результате работы были построены индукционные кривые переменной флуоресценции хлорофилла *a* для матов из нитчатых водорослей, отобранных на разной глубине в оз. Кисло-Сладкое, альго-бактериальных матов, собранных с поверхности, а также листьев морского макрофита *Ruppia maritima* L., растущего на дне в прибрежной зоне. На графике (рис. 2) видно, что серая кривая, соответствующая матам из нитчатых водорослей на дне водоема, в большей степени соответствует стандартной ОЛР-кривой, чем кривые флуоресценции других фотосинтезирующих организмов в этом озере.

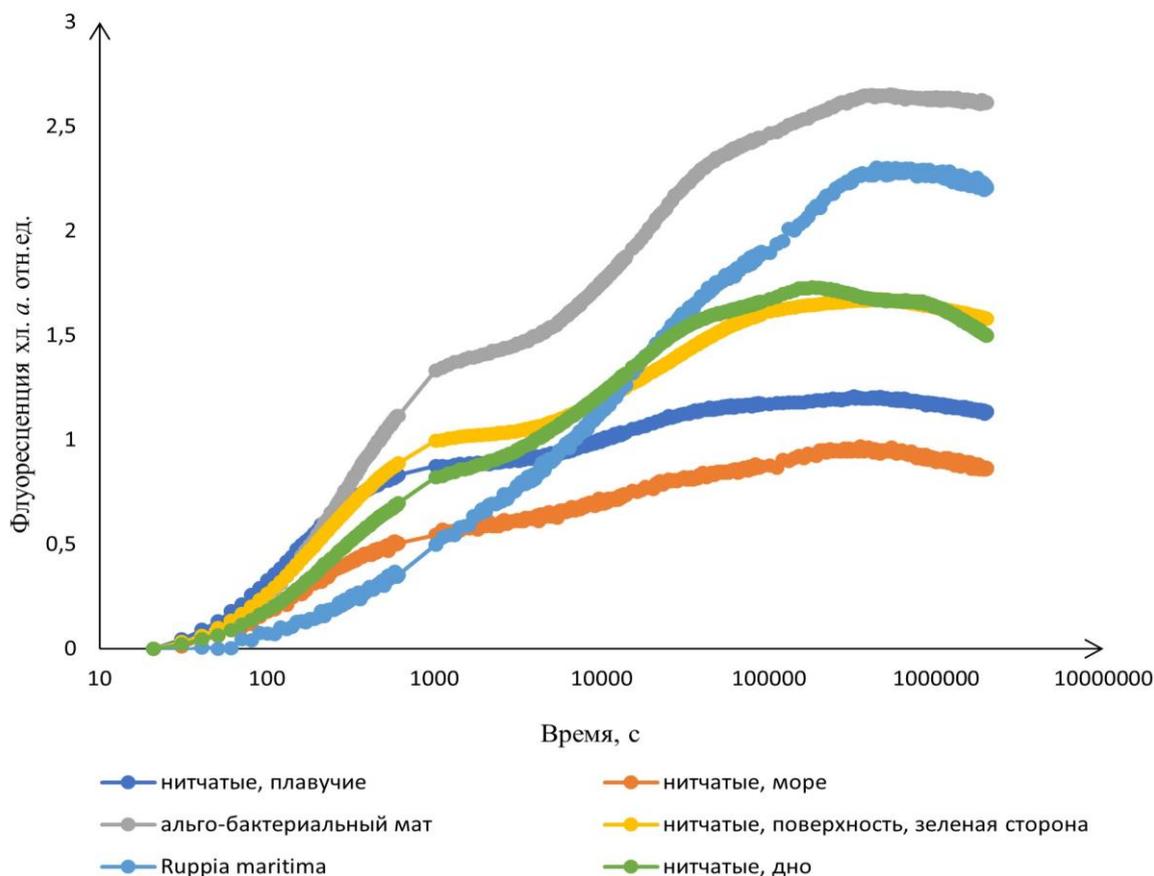


Рис. 2. Индукционные кривые переменной флуоресценции хлорофилла *a* фототрофных организмов и их конгломератов в оз. Кисло-Сладкое.

На диаграмме (рис.3) представлены значения квантового выхода ФС II у исследуемых объектов. Наибольшее значение этого параметра также наблюдается у нитчатых водорослей дна оз. Кисло-Сладкое ($F_v/F_m = 0,712$). На основе этого можно сказать, что наибольшей фотосинтетической активностью обладают альго-бактериальные маты, маты из нитчатых

водорослей, и по квантовому выходу они близки к покрытосеменному растению *Ruppia maritima* L.

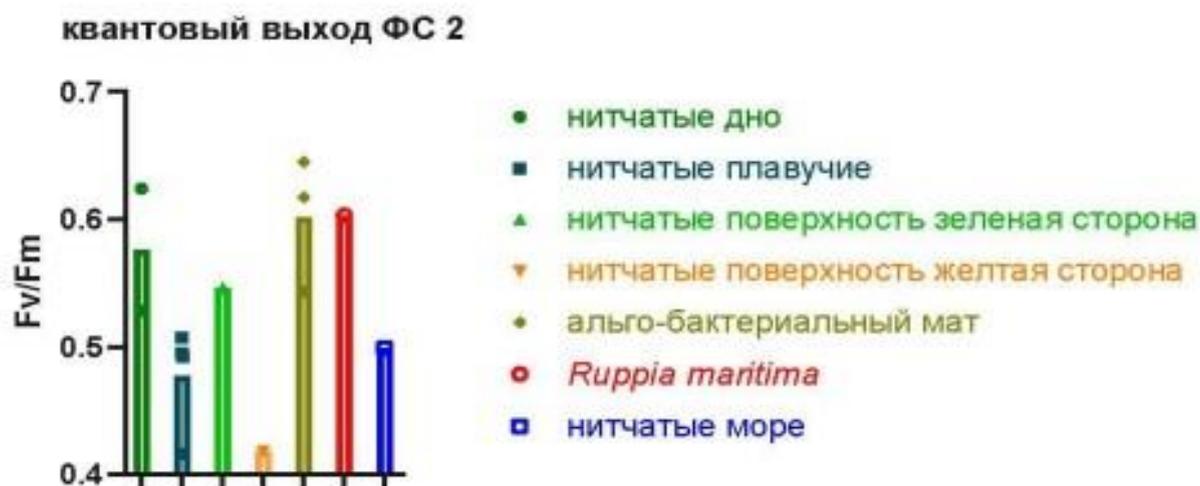


Рис. 3. Квантовый выход работы ФС II исследуемых объектов из оз. Кисло-Сладкое. На диаграмме приведены медианы и отдельные значения квантового выхода.

Анализ пигментного состава альго-бактериальных матов

Маты нитчатых водорослей, собранные с поверхности оз. Кисло-Сладкое, имели отчетливую слоистость. В верхнем слое водоросли были желтого цвета, а в нижнем – зеленого. Мы провели спектральный анализ ацетоновых экстрактов из каждого слоя. Пигментный состав был сходным. Однако у водорослей из верхнего слоя сильнее выражено каротиноидное плечо (рис. 4). Повышение содержания каротиноидов является защитной реакцией растения на окислительный стресс и фотоингибирование в условиях повышенной инсоляции. Фотоингибирование проявляется и в сниженном квантовом выходе (рис. 3) у нитчатых водорослей из верхнего, желтого слоя.

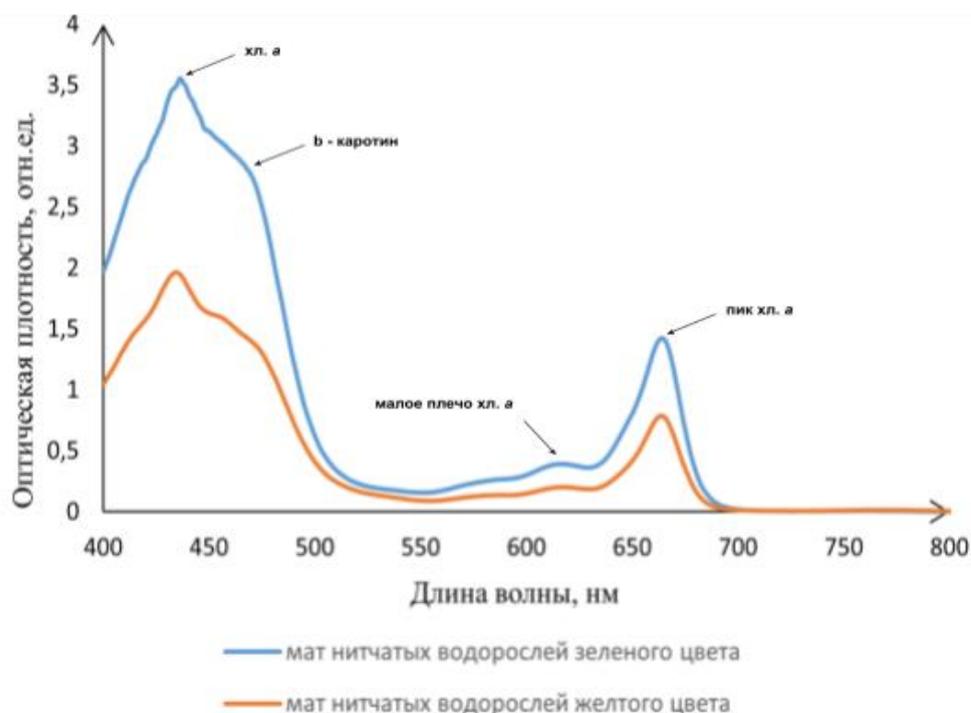


Рис. 4. Спектры поглощения света ацетоновыми экстрактами желтого и зеленого слоев матов нитчатых водорослей из оз. Кисло-Сладкое.

Количественный анализ пигментного состава водных фототрофных организмов

Мы вычислили концентрацию хлорофилла *a* у фотосинтетических организмов разной глубины оз. Кисло-Сладкое. Наибольшая его концентрация отмечена у донных нитчатых водорослей.

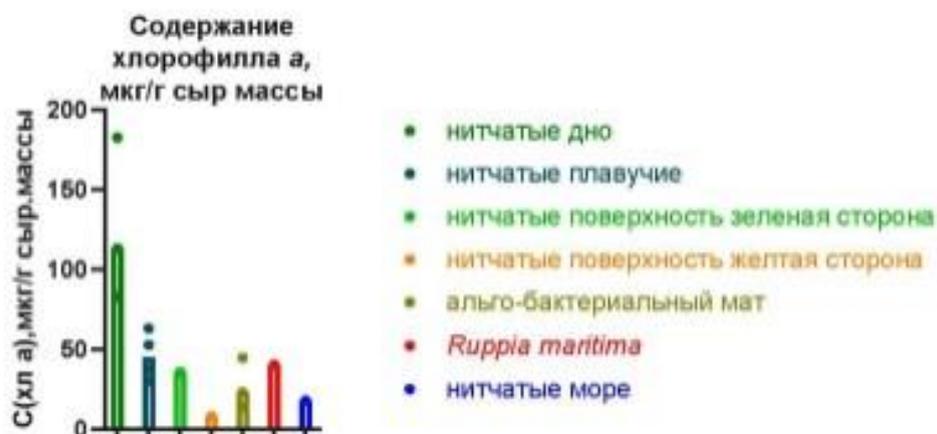


Рис. 5. Концентрация хлорофилла *a* в исследуемых объектах. На диаграмме приведены медианы и отдельные значения.

На следующем этапе мы решили проверить, существует ли корреляция между квантовым выходом ФС II и концентрацией хлорофилла *a* (Рис. 6). Судя по графику зависимость стремится к линеаризации, но четкой корреляции между этими параметрами выявить не удалось

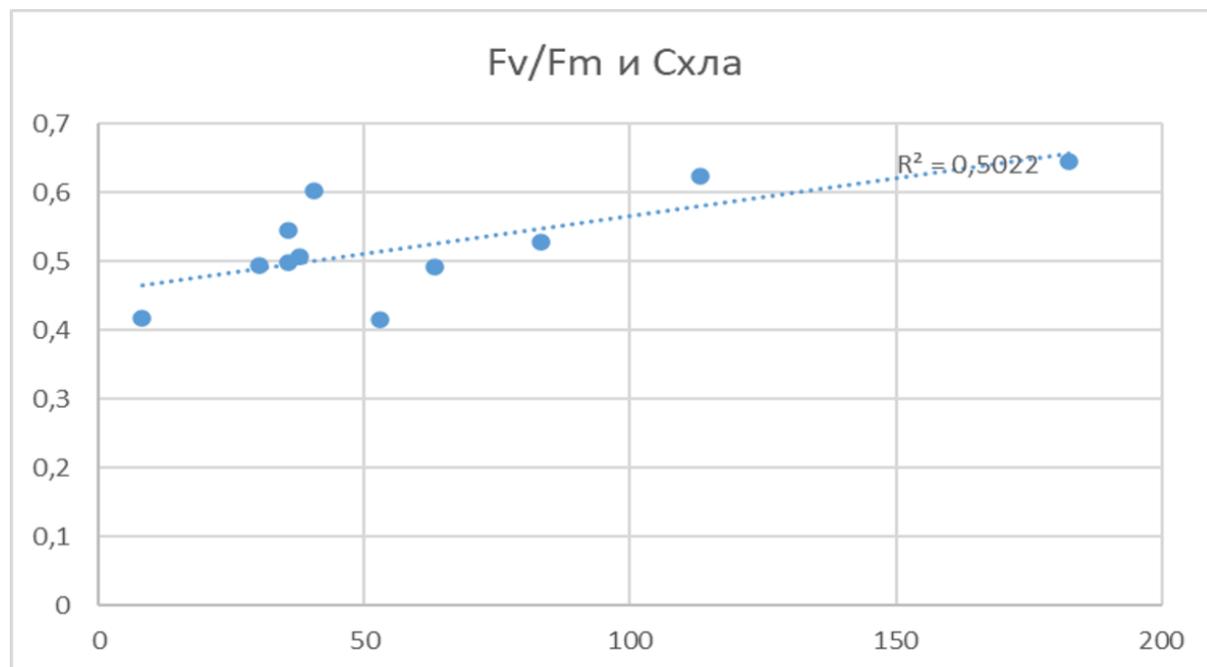


Рис. 6. Корреляция между квантовым выходом ФС 2 и концентрацией хлорофилла *a*.

Заключение

Альго-бактериальные и водорослевые маты продемонстрировали высокую фотосинтетическую активность, близкую к активности фотосинтетического аппарата у покрытосеменного водного растения *Ruppia maritima* L. Наиболее активно фотосинтез идет в донных матах из нитчатых водорослей, они же содержат максимальную концентрацию хлорофилла *a*. Все это свидетельствует в пользу того, что, маты могут вносить существенный вклад в первичную продукцию водоема и генерацию кислорода. Эти результаты согласуются с данными о фотосинтетической активности водорослевых матов в гиперсоленом озере Херсонесское, расположенном в черте г. Севастополь (Празукин и др., 2019), полученными радиоуглеродным методом. Главным источником первичной продукции в море считается фитопланктон. Известно, что в отделившихся от моря водоемах, обладающих анаэробной зоной и сообществом аноксигенных фототрофных бактерий на ее границе, продукция аноксигенного фотосинтеза может на один-два порядка превышать продукцию фитопланктона вышележащей аэробной водной зоны [Gorlenko et al., 1978] (Gorlenko V.M., Vainstein M.B., Kachalkin V.I. Microbiological characteristic of lake Mogilnoye // Arch. Hydrobiol. 1978. V. 81. № 4. P. 475 475). Это наблюдалось и в о. Кисло-Сладкое в меромиктический период его гидрологической истории (Саввичев и др., 2014) (Саввичев А.С., Лунина О.Н.,

Русанов И.И., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Иванов М.В. Микробиологические и изотопно-геохимические исследования озера Кисло-Сладкое – меромиктического водоема на побережье Кандалакшского залива Белого моря // Микробиология. 2014. Т. 83. С. 191 . л). Наши исследования указывают на еще один важный источник первичной продукции в отделившихся от Белого моря водоемах – маты из нитчатки. Таким образом, оценка первичной продукции водоема должна включать в себя не только традиционное определение параметров фитопланктона, но также учитывать альго-бактериальные и водорослевые маты, вклад которых может быть довольно существенным.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Беломорской биологической станции имени Н. А. Перцова за возможность для проведения исследований.

Список литературы:

1. Краснова Е.Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы - 2021. - Т. 48, № 3. - С. 322–333.
2. Молекулярная спектроскопия. Основы теории и практика: учебное пособие / под ред. проф. Ф.Ф. Литвина. — 2-е изд., перераб. — Москва: ИНФРАМ, 2022. — 199 с.
3. Празукин А.В., Ануфриева Е.В., Шадрин Н.В. Фотосинтетическая активность матов зеленых нитчатых водорослей гиперсоленого озера Херсонесское (Крым) // Вестник ТвГУ. Серия “Биология и экология” - 2019 – Т. 54 – № 2 – С. 87-102
4. Britton G., Liaaen-Jensen S; Pfander H.. Carotenoids handbook. Springer Basel AG — 2004
5. Jeffrey S.W, Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophyll a, b, c1 and c2 in higher plants and natural phytoplankton. // Bioch Physiol Pflanz.– 1975– V.165. – P.191–194
6. Strasser R.J., Tsimilli-Michael M., Srivastava A. Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. In: Papageorgiou, G.C., Govindjee (eds) Chlorophyll a Fluorescence. Advances in Photosynthesis and Respiration, vol 19. Springer, Dordrecht. – 2004
7. Taniguchi M., Lindsey J.S. Absorption and Fluorescence Spectral Database of Chlorophylls and Analogues. –Photochem Photobiol – 2021 – V.97 – P.136-165.



**XII Международная научно-практическая конференция
«Морские исследования и образование»
MARESEDU-2023**

**XII International conference
«Marine Research and Education»
MARESEDU-2023**

**ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ /
CONFERENCE PROCEEDINGS
Том III (IV) / Volume III (IV)**

**23-27 октября 2023 г.
г. Москва**



УДК [551.46+574.5](063)

ББК 26.221я431+26.38я431+28.082.40я431

T78

Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)» Том III (IV): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024, 666 с.:

ISBN 978-5-6049290-6-3

ISBN 978-5-6051693-0-7 (т. 3)

Сборник «Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)» представляет собой книгу тезисов докладов участников конференции, состоящую из четырех томов. Сборник включает в себя главы, соответствующие основным секциям технической программы конференции: океанология, гидрология, морская геология, гидрографические и геофизические исследования на акваториях, морские ландшафты морская биология, морские млекопитающие, рациональное природопользование и подводное культурное наследие. Помимо основных секций на конференции были представлены: пленарная сессия, посвященная 70-летию кафедры океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и 85-летию ББС МГУ имени Н.А. Перцова, секция научно-популярных фильмов и круглые столы: «Современные авиационные исследования объектов биологического разнообразия. Практика и перспективы развития» и «Применение искусственного интеллекта для изучения биологических объектов».

Все тезисы представлены в редакции авторов.

В рамках конференции участники обсудили состояние и перспективы развития комплексных исследований Мирового океана, шельфовых морей и крупнейших озер, актуальные проблемы рационального природопользования и сохранения биоразнообразия в водных пространствах, проблемы освоения ресурсов континентального шельфа, достижения науки в области морской геологии, современные подходы к исследованиям обширных акваторий дистанционными методами, проблемы устойчивого развития экосистем моря и прибрежной зоны, организацию и проведение комплексных экспедиционных исследований, преподавание «морских дисциплин», вопросы организации полевых практик студентов.

Подготовлено к выпуску издательством ООО «ПолиПРЕСС» по заказу ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

ООО «ПолиПРЕСС»

170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский
пр-т, д. 7, пом. II polypress@yandex.ru

Все права на издание принадлежат
ООО «Центр морских исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова».

© ООО «Центр морских исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова», 2024
© ООО «ПолиПРЕСС»